

分光装置の製作とその利用

研修員 土 佐 弘^{*}

中学校における「輝線スペクトルによる元素の同定」の学習に利用する目的で試作した回折格子型分光計と黒鉛電極交流アーク発光器について述べる。はじめに、この装置の構造について説明し、つぎに、その特性を検討し、元素の輝線スペクトルと溶液の吸収スペクトルの観測例について述べる。最後に、スペクトル線表示板の使用やスペクトルの投影など、学習への具体的な活用法にふれ、今後の問題点を指摘する。

1 はじめに

中学校学習指導要領の中に、炎色反応や輝線スペクトルを使って、化合物の成分元素の一部を推定する学習内容が、新たに示された。

ここでの学習では、輝線スペクトルを直視分光器で生徒に観察させたり、プリズムなどによる光学系分光装置を組み立てて観察させるという実験が行われる。

筆者は、そのための教具の一つとして、生徒に容易に観察させたり説明することができ、しかも、簡単に作れる分光装置の製作を試み、その特性について検討した。あわせて、この分光装置を用いて、中学校段階での学習指導に役立つ物質同定のための基礎資料を得るとともに、この装置の学習への活用方法についても検討したので、その結果を報告する。

2 分光計の製作

製作にあたって、分光装置の構造は、精度を上げるためにいろいろ複雑な機構が考えられる。

ここでは、中学校段階での学習目的を達し得るということを条件として、特に、つぎのようなことを考慮して製作した。

- a 構造や取扱いが、簡単であること。
- b 特殊な材料は使用せず、製作が容易であること。
- c 生徒が観察しやすく、しかも、理解しやすいこと。
- d 光源が明るく、投影ができること。

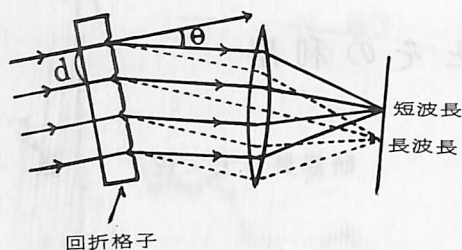
(1) 分光計

① 構造

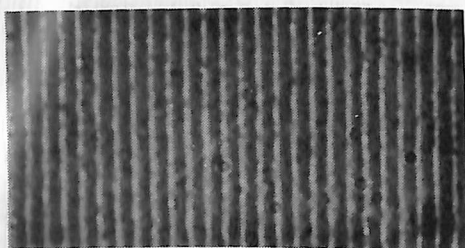
〔光学系〕この分光計の光学系は、コリメーター、透過型回折格子、望遠鏡で構成されている。

透過型回折格子による分光は、(図1)のように、平行線を刻んだ透明板に白色の平行光線が入射すると、回折光が干渉し合って一定の方向に一定の波長が強まることが原因になっている。この場合、格

* 三条市立理科教育センター 三条市立第三中学校教諭



(図1) 回折格子の原理



(図2) レプリカ回折格子 (×1300)

〔望遠鏡〕回折光は、望遠鏡（天体望遠鏡のファインダーを使用，十字線入りのため観測上便利）によって観測する。望遠鏡は，回折格子の真下を軸として左右に動かすことができる台座に，コリメーターの光軸に合わせて取りつけてある。また，回折角を測定する十字線が，台座の手前中央（軸の真下）に取りつけてある。

望遠鏡で観察したスペクトル線に合わせて台座を動かすと，その手前にある波長目盛り板の上を台座の十字線がスライドし，波長が，目盛り板によって読みとれるようになっている（図3）。したがって，スペクトル線の波長が，回折角 θ を測定して求める過程をはぶき，直接求められる。

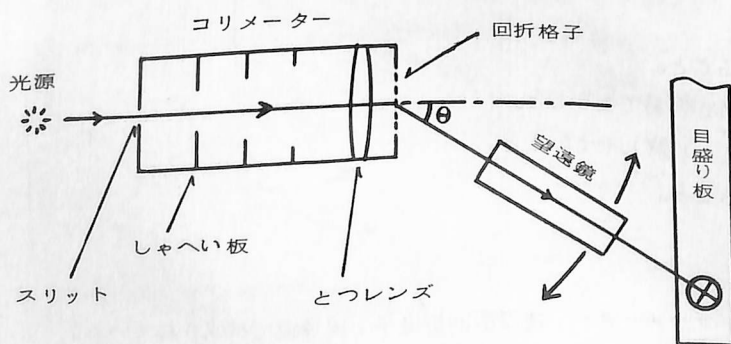
〔波長目盛り板〕波長目盛り板の目盛りの決定は，ナトリウム燈，水銀燈などの放電管による既知波

子間隔を d とすると， $d \sin \theta = N \lambda$ （ N は整数）の関係がみたされる方向に波長 λ の光が強め合って明るく見え，全体として色づいたスペクトルが見られる。

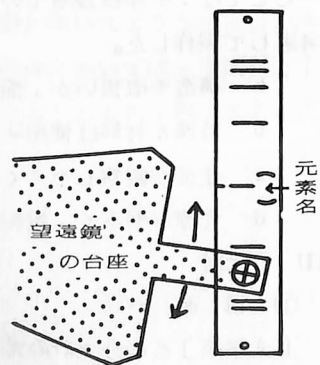
この分光計は，プリズムを用いた分光計と異なり，分散角がほぼ波長に比例している点が特徴である。

〔コリメーター〕コリメーターの構造は，幅の調節できるスリット（カミソリの刃を使用），光の内部反射を防ぐためのしゃへい板3枚，スリットから焦点距離の位置に置いたとつレンズ（ $f = 30 \text{ cm}$ ，色収差を除いてある）が円筒に組み込んである（図3）。

〔回折格子〕この装置に使用した回折格子は，レプリカ回折格子（エドモンド サイエнтиフィック社製）で，厚さ約 0.1 mm のプラスチックフィルムに，約 560 本/mm の細い線が平行に刻んである（図2）。これを，直径 20 mm の丸い穴をあけた2枚の不透明なパラガラスにはさんで円筒に取りつけた。



(図3) 分光計の構造



(図4) スペクトル線表示板

長の元素のスペクトル線、および、発光器に用いた黒鉛電極棒によるアーク放電で発生するNa, Baのスペクトル線(3(1)(2)参照)をもとにして決めた。

〔スペクトル線表示板〕生徒にとって、観察と理解が容易であるように、元素別にスペクトル線を表示した透明な板を作った。

これを、(図4)のように、波長目盛り板の上に重ねて置き、台座の十字線を、表示されたスペクトル線の位置に合わせて観察することにより、元素のスペクトル線の識別を比較的容易に行なうことができる。



(図5) 分光計

〔吸収セル、カメラ台〕コリメーターのスリットの前部には、溶液の吸収スペクトルを観察するための溶液を入れる容器受けが取り付けられており、付属品として、写真撮影の時に用いるカメラの固定台を製作した。

② 特性

〔分解能〕分光計の分解能 R を、波長 λ において分離される2本のスペクトル線の波長差 $\Delta\lambda$ の比、 $R = \lambda / \Delta\lambda$ とすると、この分光計の分解能は、500nmにおいて約560である。

〔測定波長限界〕測定可能な波長範囲は、肉眼観測による目視法では、可視部の全域400~700nmである。フィルムによる測光法、たとえば、白黒フィルムでは、長波長部における感度が低く、400~650nmの範囲であり、カラーフィルムでは、前者に比べて長波長部の感度が良好のため400~750nm程度の範囲をカバーできる。

〔プリズム分光計との違い〕プリズム分光計によるスペクトルは、長波長部ほど幅が短縮されて見える。それに比べて、回折格子分光計では、各波長部がほぼ等間隔に配列されて見えるので、生徒にはなじみやすいと思われる。

〔分散角〕この分光計による回折光の分散角は、可視部が $12 \sim 22^\circ$ である。

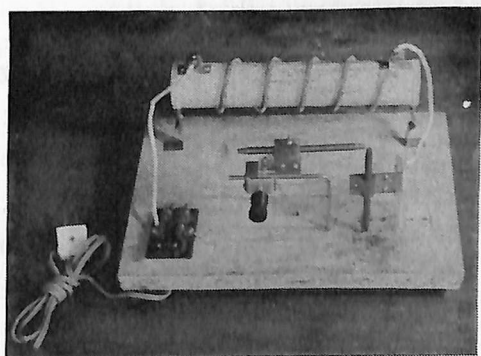
(2) 発光器

① 構造

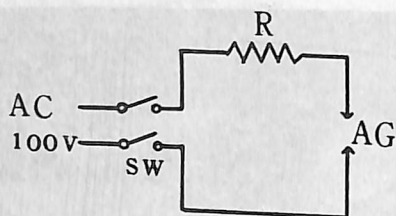
〔発光の機構〕輝線スペクトルは、原子またはイオンの中の外殻電子が、あるエネルギー準位からそれより高い準位に励起された後、再び、下のエネルギー準位に転位する時に放出されるものである。

したがって、輝線スペクトルを発生させるには、励起エネルギーを必要とするが、これには、炎光やアーク放電、スパーク放電などで試料を高温にし、熱エネルギーでまかなう方法がとられる。

筆者は、分析感度が高く、しかも、高い励起温度が



(図6) 発光器

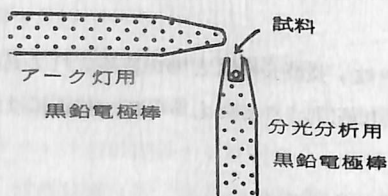


(図7) 発光器の回路

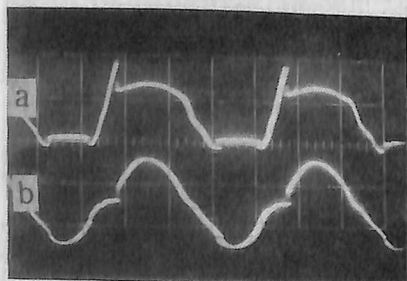
〔電極棒〕電極間隙に使用した2本の電極棒は、アーク灯用黒鉛電極棒 (LORRAINE—PARIS, CIROR 252) と分光分析用黒鉛電極棒 (島津, REGULAR R6) である。

両電極に、分光分析用電極棒を用いることが理想的なのであるが、100V交流電圧を使用するこの装置で、アークを長時間連続して発生させることは困難である。これに比べて、アーク灯用電極棒は、アークの発生が容易であり、しかも、電極間隙の調節がやや粗雑でも、かなり長時間にわたって放電が持続するので有利である。しかし、この種の電極棒には、一般に各種の元素が多数混入されておることがあり、そういうものは多数のスペクトル線を出すので、分光分析に使用するには適当でない。

この装置に使用したアーク灯用電極棒にも、いろいろの元素が混入されている。しかし、この電極棒は、その発するスペクトル線が少なく、分析しようとする元素のスペクトル線を妨害しない程度である。しかも、この電極棒が発するスペクトル線は、他の元素のスペクトル線を測定する際の標準線として使用 (3(1)②参照) できるという便利な点もあるので、この装置に使用した。



(図8) 電極棒の配置



(図9) 電圧、電流の波形
(a: 電圧, b: 電流)

得られるアーク放電による発光器 (図6) を製作した。

この発光器による発光の機構は、放電によって熱エネルギーを与えることによるものであって、電場により荷電粒子の運動が激しくなるためのものではない。

〔発光器の回路〕回路は、(図7)に示すように、100Vの交流電源に、安定抵抗器 R ($1\text{ KW} = \text{クロム線}, 8.5\Omega$) と電極間隙 AG を直列に結んだ。

このように、放電の容易さ、発光状態などの点から考えて、アーク灯用と分光分析用の電極棒の組み合わせで装置を作ったが、この点については、今後、さらに検討を加えてみる必要がある。

なお、電極棒の配置は、(図8)のようにした。分光分析用電極棒には、ドリルで径 3 mm 、深さ $2 \sim 3\text{ mm}$ の穴をあけ分析試料を入れて放電させる。

〔アークの起動〕この発光器の放電は、自己起動しない。放電を行なわせるには、はじめに、電極間隔を $0.5 \sim 1\text{ mm}$ にしておき、それから、電極棒の先端を互いに接触させた後ゆっくりと引き離す。上極のアーク灯用電極棒が可動式になっているので、あらかじめ電極間隔を調節しておけば、下極の分光分析用炭素棒に接触させても、それを放すことにより上極はもとの位置に復帰するような構造になっている。

② 特性

〔電圧—電流特性〕製作した発光器の電極間隙における電圧、電流は、(図9)のように変化する。

電流波形は、交流電源の電圧波形にほとんど近い正弦波形を示しているのに対して、電圧波形は、やや複雑な変化を示している。これは、アークによる放電が負特性を示すからである。

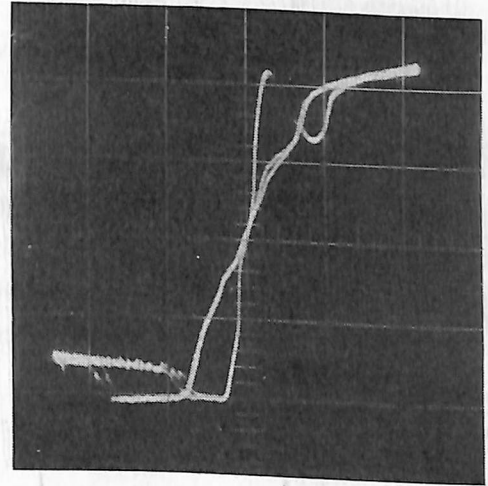
電圧波形の変化を見ると、電圧は、はじめに電極間隙の絶縁破壊の電圧まで上昇した後、一定電圧に低下し、それが半サイクルの大部分の間、変わらない。そして、半サイクルの終わりにおいて負特性があらわれ、再び、電圧の上昇がみられる。このことは、正負の部分において同じことが繰り返されるが(図9)で、それが若干異なるのは、この装置で使用了2本の電極棒の質がそれぞれ違うためであると思われる。また、交流アークでは、電圧波形の平坦部にあたる半サイクルより少し短い間において放電が行なわれる。

(図10)は、分析間隙の電圧と電流の関係をブラウン管オシロスコープで観測した特性曲線である。このように、アーク放電では、アーク柱の抵抗が電流の増減と逆に変化し、オームの法則に従わない。いわゆる負特性のあらわれるのが特徴である。したがってアークを持続させるには、適当な抵抗を回路に挿入することが必要となる。

〔放電状態、持続時間〕放電開始直後は、アーク電圧が低く、負特性はあまりみられない。放電が進み、電極棒が赤熱されてくるにつれて、負特性が顕著にあらわれ、放電は安定する。

この装置では、放電開始15~30秒後において安定した状態になり、発光も良好となる。その後、放電は続き、電極棒の減少による電極間隔の増大によって停止するまで、2~3分間持続する。

〔炎光による発光との違い〕交流アークでは、数1000℃の高温が得られる。そのため、炎光では発光することのできない高温での励起による元素のスペクトル線を検出することができる。



(図10) 電圧—電流特性曲線
(縦軸：電圧，横軸：電流)

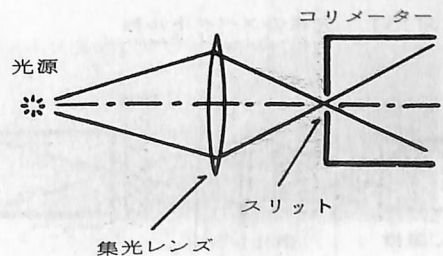
3 スペクトルの観測

(1) 輝線スペクトル

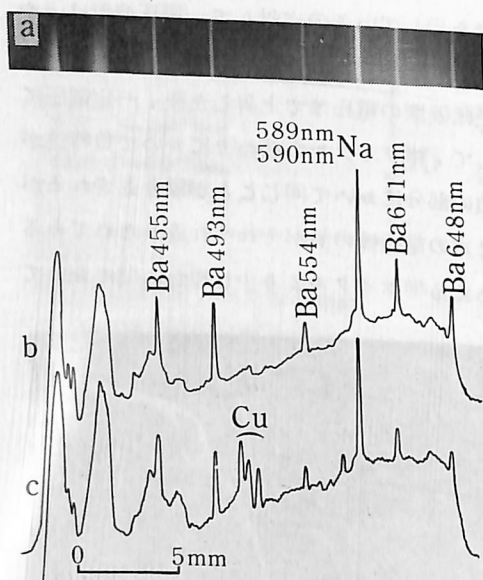
① 観測の方法

集光法は、スリットに入る光量の増加、スリットの均一照射、および、アーク部分の光をとり出すために、(図11)のような、スリット結像法を用いた。

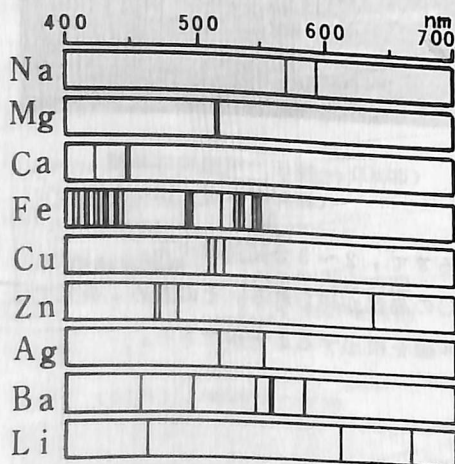
この場合、スリット上に光源の像が結ぶ位置に、集光レンズを置く。また、電極の白熱部分から発する連続スペクトルによるバックグラウンドをできるだけ除くために、白熱部分をスリットから少しへいしなれば



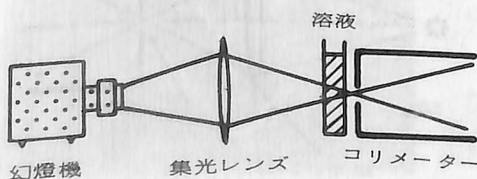
(図11) スリット結像法



(図12) ミクロホトメーター記録チャート



(図13) 元素のスペクトル線



(図14) 吸収スペクトルの観察装置

ならない。

観測の方法は、望遠鏡を用いてそれぞれのスペクトル線を観測する目視法と、望遠鏡の位置にカメラを置いてスペクトルを撮影する写真測光法の二通りがある。

以下、写真測光法を中心に述べる。

カメラは、 $f = 135 \text{ mm}$ 望遠レンズを使用し、フィルムは、白黒フィルム (ASA 100) とスライド用カラーフィルム (ASA 100) で、絞り F 5.6, 露出時間 2~3 秒で撮影した。

② 波長の測定

(図12)のaは、黒鉛電極棒のアーク放電による輝線スペクトルの写真であり、同図bは、その黒化度をミクロホトメーターで測定したチャートである。

ここでは、NaとBaのスペクトル線が、強くあらわれている。このスペクトル線は、電極棒に分析試料を入れてそのスペクトル線を観測する際にもあらわれるので、前に述べたように、これを標準線として使用した。

(図12)cは、Cuの場合を示したが、このような、未知の波長の測定は、フィルム上のスペクトル線を座標測定器で測定した値や、ミクロホトメーターの記録チャートから求めた値を、前述の標準線をもとにした分散曲線法で求める。

③ スペクトル線表示板による元素の同定

この装置で、輝線スペクトルが観察された主なる元素とそのスペクトル線を、(図13)に示した。前に述べた線スペクトル表示板には、この図のスペクトル線がしるされている。

目視法では、この表示板を、観測するスペクトル線に合わせて、元素の同定をする。

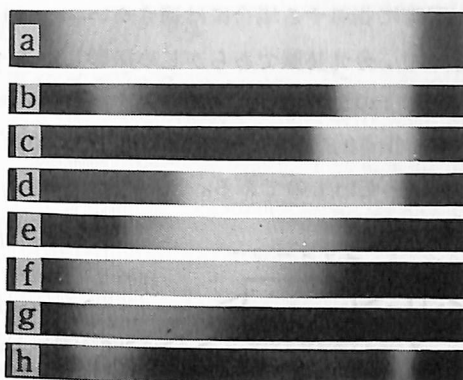
(2) 溶液の吸収スペクトル

白色光を溶液にあて、その透過光を分光計に入れると、溶液の吸収スペクトルを観測することができる。

(図14)のように、幻燈機のような明るい光源を用い、分光計の望遠鏡のかわりに、とつレンズを使う

と、スクリーンに投影することも可能である。

(図15)に、溶液の吸収スペクトルの観測例を示した。aは連続スペクトルであり、bはフェノールフタレイン、cはメチルオレンジ、dはクロロフィル、eは硫酸ニッケル、fは硫酸銅、gはメチレンブルー、hはメチルバイオレットの各溶液の吸収スペクトルである。



(図15) 溶液の吸収スペクトル

4 学習への活用

(1) 輝線スペクトルによる元素の推定の学習

中学校学習指導要領の内容によれば、「炎色反応や輝線スペクトルについては、化合物中では、元素はその性質を示さないが、なお存在することを認識する一つの手がかりとして扱い、また、化合物中の成分元素の一部を推定することに関心をもたせる。」としている。

したがって、輝線スペクトルの学習は、化合物と元素の学習の中で、物質を同定する意義や操作を重視し、未知物質の成分を推定する方法、および、それを探求する意欲と興味を喚起させることをねらいとしている。

このような立場において、ここにおける学習指導の方法は、炎色反応では識別できなかった元素の特徴を、分光装置を用いて、その輝線スペクトルを観察させる。その結果、個々の元素は、それぞれ特定の輝線スペクトルを示すことから、化学的方法では分析困難な微量の物質でも、分光分析によって識別できることが可能であることを理解させる。

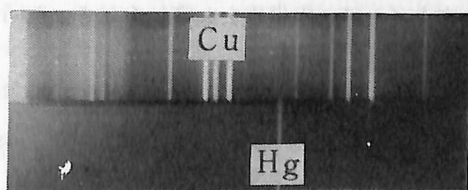
なお、この装置を学習に用いるとすれば、生徒になじみ深い元素で、しかも、比較的容易に識別できる輝線スペクトルを出すものをとりあげるべきであろう。すなわち、Na, Mg, Ca, Fe, Cu, Zn, Agなどがあげられる。そのほかに、放電管などによる輝線スペクトルの観察も効果的と思われる。

(2) この装置の使用法

この装置は、元素を同定する学習に、つぎのようにして使用することができる。

① 波長目盛り板、線スペクトル表示板を利用する方法

この装置で、輝線スペクトルをたゞ観察するだけでも意味はあるが、生徒にとって、元素の線スペクトルの特徴を識別するには、かなり困難であると思われる。それで、前に分光計の構造の項でも述べたように、波長目盛り板や線スペクトル表示板を使って観察すれば、容易に元素を推定することができるであろう。



(図16) 二重撮影によるCuとHg(水銀燈)のスペクトル線

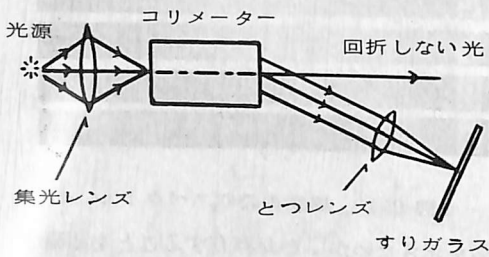
② スライドによる方法

上記の方法は、観察者が一人に限られるので、多人

数を同時に指導する場合には適さない。

それで、分光装置であらかじめ撮影したフィルムをスライドにして見せる方法がある。この場合は、(図16)のように、二つの元素を組み合わせることで撮影したものが、より効果的であろう。

なお、指導的效果と生徒の学習への興味関心を喚起させるという点で、特に、ここでは、カラーライドを用いたいものである。



(図17) 投影装置

③ 投影による方法

発光しやすい元素については、暗室でスペクトルをすりガラスに投影して観察することができる。

(図17)は、スペクトルを投影する方法の一例を示したものである。

この場合、分光計に取りつけてある望遠鏡のかわりにとつレンズを使用し、拡大されたスペクトルをすりガラスに投影する。

(3) その他

分光計は、輝線スペクトルの学習のみでなく、そのほかの学習での用途も考えられる。たとえば、生物教材の光合成の学習において、「葉緑素の光の吸収の実験」や、光教材のスペクトルの学習においては、「プリズムや回折格子によるスペクトルの観察」などに、直接利用することができよう。

5 おわりに

以上は、分光装置の製作とその特性についての検討、および、この装置の学習への活用について、研究を行なったものである。

装置の製作にあたっては、なるべく手近かにある材料で、安価に製作できるということをねらったため、分光計の精度、発光器の安定性などについて、まだ、多少の問題点が残されている。しかし、中学校の学習には、じゅうぶん使用することができると考える。

今後は、上記のような、装置自体の問題点について、さらに検討を加えるとともに、教具としての使いやすさ、生徒の理解の容易さという点からの改良も合わせて研究していきたい。

最後に、スペクトルの同定にいろいろとご教示くださった新潟大学理学部の小山先生、ならびに、ミクロホトメーターの借用をお許しくださった同学部斎藤、高橋両先生に、厚くお礼を申し上げる。

文 献

- 1) 芝 亀吉：物理定数表 岩波書店 (1946) PP.254-260
- 2) 鹿島次郎、安田和夫：金属の発光分光分析法 共立出版 (1967)
- 3) 浜口 博 他：アークスペクトル写真集 丸善 (1969)
- 4) 武藤義一 他：分光化学 共立出版 (1961)